

# A INTEGRAÇÃO DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO E A PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE TERMOPLÁSTICOS VULCANIZADOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE PNEUS

## INTEGRATION OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE AND SUSTAINABLE PRODUCTION OF THERMOPLASTIC VULCANIZATES FROM TIRE WASTE/DEVELOPMENT OF THERMOPLASTIC VULCANIZES FROM WASTE TIRE

Flávia Mayara Gonçalves<sup>1</sup>  
Alex Ramos Machado<sup>2</sup>  
Alex da Silva Sirqueira<sup>3</sup>

**Resumo:** Este estudo aborda a utilização sustentável de resíduos sólidos, com adição de pó de pneu no Polietileno para produzir Termoplásticos Vulcanizados (TPVs). A técnica de compatibilização não reativa mostrou melhorias no módulo elástico do PEBD. As amostras compatibilizadas com EVA apresentaram menor variação no envelhecimento, e maior resistência ao impacto quando combinadas com SBR. Os resultados mostram a influência da massa molar no escoamento dos polímeros. O estudo contribui para o desenvolvimento de TPVs sustentáveis e melhoria nas propriedades físico-mecânicas. A iniciação científica em TPV proporcionou aos alunos habilidades investigativas e científicas, preparando-os para enfrentar desafios no mercado de trabalho.

**Palavras-chave:** Elastômeros; Resistência ao impacto; Pó de pneu; Reciclagem; Iniciação Científica.

**Abstract:** This study addresses the sustainable use of solid waste by adding tire powder to Polyethylene to produce Thermoplastic Vulcanizates (TPVs). The non-reactive compatibilization technique improved the elastic modulus of LDPE. EVA-compatible samples showed less aging variation and higher impact resistance when combined with SBR. The results demonstrate the influence of molar mass on polymer flow behavior. The study contributes to the development of sustainable TPVs and improvements in physical-mechanical properties. The scientific initiation in TPV provided students with investigative and scientific skills, preparing them to face challenges in the job market.

**Keywords:** Elastomers; Impact resistance; Waste of tire; Recycling; Scientific initiation.

**Data de submissão:** 05.09.2023

**Data de aprovação:** 03.07.2024

---

<sup>1</sup> Graduanda em Engenharia de Materiais, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). E-mail: 1914432037@uezo.edu.br.

<sup>2</sup> Graduando em Engenharia de Materiais, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). E-mail: 2014432032@uezo.edu.br.

<sup>3</sup> Professor Associado no Departamento de Materiais da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) da Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia do campus Zona Oeste. E-mail: assirqueira@gmail.com.

**Identificação e disponibilidade:**

(<https://revista.univap.br/index.php/revistaunivap/article/view/4512>,  
<http://dx.doi.org/10.18066/revistaunivap.v30i68.4512>).

**1 INTRODUÇÃO**

A expansão das áreas urbanas e o incremento demográfico estão intimamente relacionados com a degradação das zonas verdes das cidades, e o acréscimo na produção de resíduos urbanos. O impacto ambiental decorrente do desmatamento e descarte inadequado de resíduos sólidos, podem indicar o nível de desenvolvimento social, tecnológico e educacional de um país. Nos países subdesenvolvidos é comum observar valas negras, assoreamento de rios, queimadas e lixões. As origens do descarte inadequado estão estreitamente associadas com os padrões sociais, como o consumo excessivo, a cultura da população do uso de descartáveis, a produção de materiais de alto impacto ambiental e a falta de políticas públicas que priorizem o meio ambiente. Para contornar este problema, iniciativas governamentais de reciclagem e investimentos em pesquisas de inovações tecnológicas, com vistas à transformação dos resíduos descartados em novos produtos, são essenciais (Gouveia, 2012; Sirqueira & Fiore, 2022)

A reciclagem de materiais sólidos, principalmente os poliméricos pós-consumo, tem recebido atenção por parte dos principais centros de pesquisas, universidades e indústrias em todo o mundo. Devido à problemática relacionada ao descarte inadequado deste tipo de resíduo sólido (Santos et al. 2013; Teixeira, et al., 2017).

Os polímeros levam séculos para serem totalmente degradados pelo meio ambiente. Dentro da classificação dos resíduos poliméricos existem os mais nocivos, como os pneus inservíveis. Estes são considerados os poluentes poliméricos mais prejudiciais ao meio ambiente, pois, apresentam em sua composição polímeros de alta massa molecular (borracha), antioxidantes, plastificantes, cargas orgânicas inorgânicas, ligas metálicas e lonas. Além de serem potenciais criadouros de larvas e vetores de doenças, quando descartados indevidamente (Sirqueira & Fiore, 2022).

O Brasil enfrenta sérias questões ambientais na reciclagem de materiais pneumático, pois é o quinto maior produtor mundial de pneus para caminhões e ônibus, e o sétimo para automóveis de passeio (Silva et al., 2021). Mesmo diante da pandemia de COVID-19 em 2020, a indústria de pneumáticos vendeu mais de 53,8 milhões de produtos (reposição e veículos novos). Nesse contexto, cabe ressaltar a responsabilidade nacional, que em 2019 destinou de forma ambientalmente correta mais de 471 mil toneladas de pneus inservíveis. As indústrias de pneumáticos ao assumirem suas responsabilidades ambientais, tornam-se referência em logística reversa (France, 2021). Mesmo assim, o impacto ambiental no Brasil ainda é muito alto, menos de 5% do material recebe tratamento adequado.

A Lei nº 416/2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), tem como objetivo regulamentar a produção, coleta e destino dos pneus produzidos e importados no país. Devido aos impactos ambientais associados ao descarte incorreto de pneus inservíveis. Conforme a legislação, o pneu inservível é definido como o pneu usado que sofreu danos irreparáveis em sua estrutura, tornando-se inadequado para rodar ou ser reformado. A importância dessa legislação está relacionada à necessidade de garantir a destinação ambientalmente adequada dos pneus inservíveis. A destinação adequada dos pneus consiste em procedimentos técnicos nos quais os pneus são descaracterizados de sua forma inicial, e seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados por outras técnicas

permitidas pelos órgãos ambientais competentes. O objetivo da lei é evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, ao mesmo tempo minimizar os impactos ambientais adversos. Ao estabelecer diretrizes claras para o tratamento de pneus inservíveis, a legislação busca combater problemas relacionados à disposição inadequada desses materiais. A correta destinação dos pneus inservíveis permite a redução do acúmulo de resíduos sólidos, evita a contaminação do solo e da água por substâncias tóxicas presentes nos pneus e promover a reciclagem, contribuindo para a economia circular e a sustentabilidade ambiental. O cumprimento da legislação é responsabilidade tanto das empresas produtoras e importadoras de pneus, que devem adotar práticas sustentáveis em relação à destinação dos produtos, quanto das entidades responsáveis pela coleta e processamento dos pneus inservíveis. Os órgãos ambientais competentes têm o papel de monitorar e fiscalizar o cumprimento das normas estabelecidas na legislação. Portanto, a regulamentação da destinação ambientalmente adequada dos pneus inservíveis é uma medida essencial para promover a gestão responsável de resíduos, preservar o meio ambiente e garantir a saúde coletiva, além de incentivar práticas mais sustentáveis na indústria e na sociedade como um todo. Entretanto, as ações ainda não foram totalmente implementadas no Brasil.

Para contribuir com o desenvolvimento de novos materiais reciclados, os pesquisadores da área de Materiais têm buscado novas aplicações, principalmente no aproveitamento das propriedades mecânicas da borracha vulcanizada.

Embora ações de reciclagem sejam apoiadas pelo governo e entidades sociais, a borracha vulcanizada presente nos pneus continua sendo um grande desafio na área de Engenharia de Materiais. A borracha vulcanizada nos pneus descartados indevidamente quando queimada como combustível, resulta na recuperação de apenas 37% da energia incorporada durante a fabricação do produto. Desta maneira, a reciclagem dos pneus é altamente benéfica para o planeta, pois contribui para a redução no acúmulo de resíduos em aterros sanitários, evita a contaminação do solo, reduz os riscos de incêndio e previne o surgimento de pragas que podem afetar a saúde humana (Sirqueira & Fiore, 2022).

Uma alternativa para obter produtos mais facilmente recicláveis a partir dos resíduos de pneus é a conversão em pó de borracha. Este resíduo é utilizado na forma de pó em composição para asfalto, cargas e em termoplásticos (Ruiz et al., 2020). Ao utilizar o pó de pneu em misturas com termoplásticos, o produto resultante é a mistura física entre dois materiais imiscíveis, produzindo um material com baixas propriedades mecânicas. Este comportamento de perda de propriedades é observado devido a incompatibilidade termodinâmica, estrutural e de massa molecular entre os dois polímeros. Esta primeira conclusão sugere não realizar a adição do pó de pneu em termoplásticos. Mas, se a fase elastomérica for vulcanizada durante o processo de mistura, o material final tem propriedades mecânicas similares ao elastômero inicial, quando vulcanizado em sistema de reticulação convencional. O material produzido por esta técnica apresentará a facilidade de processamento do termoplástico e a elasticidade do elastômero, esta nova classe material é denominada de termoplástico vulcanizado (TPV) (Cossa et al., 2009; Ma et al., 2015; Magioli et al., 2010; Ning et al. 2018; Soares et al., 2019).

Os TPVs são compostos poliméricos constituídos de borracha reticulada (fase dispersa) e termoplástico (fase contínua). Geralmente, a proporção entre borracha e plástico (borracha/plástico) varia entre 50/50 e 70/30, em massa. O aumento no teor da fase termoplástica resulta em elevado módulo elástico, e quando o maior teor é a borracha vulcanizada observa-se melhora na elongação na ruptura do TPV. Estes

materiais são utilizados nas indústrias automobilísticas em substituição a borracha convencional, reduzindo o impacto ambiental (Bouchart et al., 2008; Innes et al. 2023; Ponsard-Fillette et al., 2005; Song et al. 2023).

Quando a definição de TPVs foi inicialmente apresentada, Coran tentou preparar diferentes tipos de TPVs utilizando vários plásticos e borrachas. Na época, foi constatado que apenas as borrachas e o termoplásticos com compatibilidade resultaram em TPVs com boas propriedades. Desde então, muitos estudos se concentraram no uso de pares de borracha e plástico compatíveis para preparar TPVs com domínios de borracha finos e boas propriedades (Yao et al., 2016). Os TPVs produzidos pelos polímeros EPDM (terpolímero de Etileno-Propileno-Dieno) e PP (polipropileno) têm compatibilidade tecnológica, polímeros apolares (Innes et al., 2023; Song et al., 2023). Os TPVs exibem partículas de borracha finamente dispersas na fase de PP, resultando em propriedades superiores. Este par polimérico foi amplamente estudado e utilizado na indústria.

Nas últimas décadas, borrachas e plásticos incompatíveis têm sido amplamente investigados para preparar TPVs com aplicações especiais (Favakeh et al., 2020; Kassa et al., 2018; Soares et al., 2008). Infelizmente, esses TPVs geralmente exibem domínios de fase de borracha grosseiros, baixa interação interfacial entre a borracha e os plásticos e, portanto, propriedades não aplicáveis ao mercado de elastômeros. Nesses casos, é necessário compatibilizar a borracha e o termoplástico para obter domínios de borrachas menores, e melhorar a interação interfacial. O uso de compatibilizante é essencial durante a preparação de TPVs com pares de borracha e plástico incompatíveis.

Em alguns casos, dois ou vários compatibilizantes foram usados simultaneamente para aumentar a compatibilidade entre os diferentes componentes envolvidos nos TPVs. Por exemplo, polipropileno enxertado com grupos anidrido maleico (PP-g-MAH) e a borracha nitrílica carboxilada (XNBR) foram empregados simultaneamente para aumentar a compatibilidade entre a borracha nitrílica (NBR) e o polipropileno (PP), resultando na redução significativa no tamanho dos domínios de borracha, distribuição mais uniforme das partículas de borracha e aumentar a área interfacial em TPVs. Quando a trietilenotetramina (TETA) foi adicionada para reagir com PP-g-MAH, obteve-se morfologia mais uniforme e redução no tamanho de partícula de borracha. Estudos anteriores envolvendo o uso do PP-g-MAH e a borracha nitrílica com grupos amina (ATBN) foram usados simultaneamente para melhorar a compatibilidade entre a borracha nitrílica NBR e PP. Os resultados mostraram que as partículas de NBR nos TPVs ficaram menores e mais uniformemente dispersas após a compatibilização. As partículas de NBR menores e mais uniformes resultaram na formação de mais e menores cristais de PP, bem como em uma taxa de cristalização mais alta e um tempo de cristalização mais curto do PP, o que poderia ser atribuído à nucleação interfacial induzida pelas partículas de NBR reticuladas (Ning et al., 2017; Soares et al., 2008, 2019).

Nosso grupo de pesquisa com esforços colaborativos, concentra-se na pesquisa das potencialidades do pó de pneu em combinação com termoplásticos, originando assim materiais completamente novos (Cossa et al., 2009). Nossos esforços se concentraram na incorporação do pó de pneu em misturas com polipropileno, tendo em vista a concepção de elastômeros termoplásticos vulcanizados dinamicamente de última geração, que englobam um componente reciclado. O foco da investigação estava na otimização da mistura do pó de pneu e do PP, utilizando o procedimento estatístico de planejamento fatorial de experimentos, com ponto central. Os parâmetros de investigação selecionados para o estudo englobaram o pó de pneu, o

peróxido de dicumila e a bismaleimida, todos dispostos em três níveis, e o ponto central. O delineamento do experimento foi meticulosamente elaborado para analisar as influências e interações dos fatores, tanto os principais quanto as suas relações mútuas, sobre as propriedades de tração, alongamento e resistência ao inchamento em óleo. Os resultados mostraram que a presença do pó de pneu exerce influência preponderante na otimização do desempenho mecânico das misturas (Cossa et al., 2009). Em particular, observamos aumento expressivo de até 150% na resistência ao inchamento em determinadas formulações. Essas conclusões sublinham a viabilidade e o potencial de aprimoramento proporcionados pelo teor adequado de pó de pneu, indicando um caminho promissor para aperfeiçoar o desempenho desses novos materiais compostos.

Os TPVs com resíduo de borracha são obtidos por meio do processo da mistura do pó de pneu com termoplásticos, seguido da vulcanização dinâmica. Essa abordagem não apenas reduz os custos, mas também melhora a resistência dos materiais em comparação com os termoplásticos tradicionais. Os TPVs, atualmente, são utilizados para substituir as borrachas vulcanizadas em diversas aplicações na indústria automobilística, pois combinam a elasticidade dos elastômeros com a reciclabilidade dos termoplásticos (Innes et al., 2023; Ning et al., 2018; Tian et al., 2012; Yao, et. al., 2016).

No atual cenário de inovação e tecnologia, leva-se em conta a qualidade e a sustentabilidade dos produtos produzidos. Os desenvolvimentos na Engenharia de Materiais são fundamentais para explorar novos materiais, compósitos e o reuso de materiais pós consumo.

A iniciação científica (IC) durante a graduação é importante para a formação dos alunos de todas as áreas. Para o novo curso de Engenharia de Materiais da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, a IC proporcionará aos alunos oportunidades de envolvimento na pesquisa e o desenvolvimento profissional (Sirqueira & Santos, 2023). Os alunos poderão aumentar os conhecimentos na área de materiais, colocar em prática a teoria de sala de aula, ampliar a consciência ecológica e a inserção de práticas de proteção ao meio ambiente.

O presente trabalho de iniciação científica teve como objetivo treinar alunos de graduação, e desenvolver novos termoplásticos vulcanizados, utilizando resíduos sólidos de pó de pneu provenientes de carros de passeio. A proposta envolve a avaliação da compatibilidade não reativa entre o polietileno de baixa densidade (PEBD) e o pó de pneu.

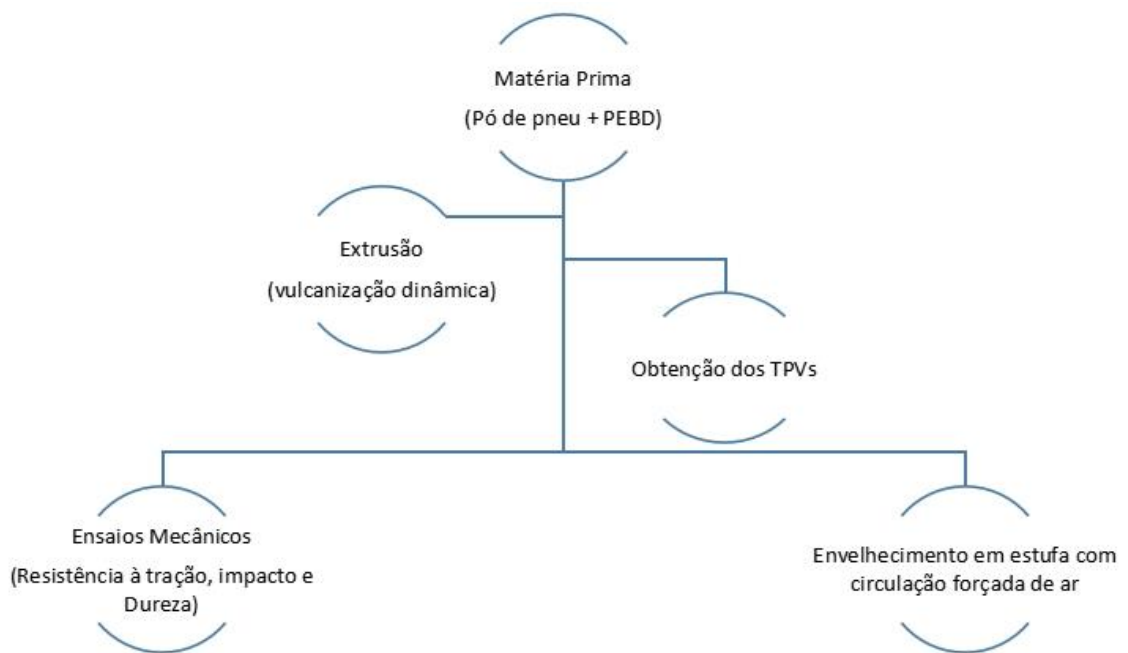
A combinação do PEBD e do pó de pneu em TPV requer a superação das diferenças estruturais e de massa molar entre os polímeros envolvidos. Pois, este sistema apresenta incompatibilidade termodinâmica, assim faz-se necessário a introdução de agentes interfaciais ou compatibilizantes (Scares et al., 2006; Soares et al., 2008). Optou-se pela compatibilização não reativa, adicionando um terceiro polímero ao par polimérico envolvido, o copolímero de etileno-acetato de vinila (EVA), e/ou a borracha de estireno-butadieno (SBR), este último presente na composição do pó de pneu. A utilização do copolímero de EVA e da borracha SBR visa promover a compatibilidade entre os componentes da mistura, melhorando a adesão interfacial e a homogeneidade do TPV. O EVA por ser um termoplástico, facilita o escoamento, enquanto o SBR contribui para o aumento do módulo do TPV. Essa sinergia de propriedades permite a obtenção de materiais com características intermediárias entre os elastômeros e termoplásticos, combinando a elasticidade com reciclabilidade.

## 2 METODOLOGIA

Os materiais utilizados para a produção dos TPVs reciclados foram: polietileno de baixa densidade (PEBD, fornecido pela Braskem e MFI= 32 g/10 min), pó de pneu (proveniente da Recauchutadora Nova Friburgo e granulometria de 20 mesh, obtido de pneus de carros de passeio), copolímero de estireno-butadieno (SBR 1502, fornecido pela empresa Nitriflex e viscosidade mooney de 50) e copolímero de etileno-acetato de vinila (EVA, com 19% de teor de acetato de vinila, fornecido pela empresa BRASKEM e MFI = 40 g/10 min).

A metodologia do experimento pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - Metodologia de pesquisa.



Fonte: autores.

As misturas envolvendo PEBD/Pó de Pneu foram realizadas em mini-extrusora AXPlásticos. Todos os componentes (polietileno de baixa densidade, pó de pneu proveniente de carros de passeio e/ou os compatibilizantes) foram adicionados em única etapa. A mini-extrusora AXPlásticos foi programada para operar na temperatura de 190°C, velocidade de 35 RPM e tempo de residência dos materiais de 1 minuto. A vulcanização dinâmica ocorreu com adição de 0,5 % de peróxido de dicumila na mistura. Após o processamento em extrusora os TPVs foram triturados em moncho de facas. A granulometria dos TPVs utilizada foi de 20 mesh. Os materiais foram adicionados em extrusora nas proporções estabelecidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Formulação dos TPVs.

<b>Código</b>	<b>Componentes</b>	<b>Teor (%)</b>
00	PEBD	100
01	PEBD/PÓ PNEU	75/25
02	PEBD/PÓ PNEU/ EVA	75/20/5
03	PEBD/PÓ PNEU/ SBR	75/20/5
04	PEBD/PÓ PNEU/ SBR/EVA	75/20/2,5/2,5

Fonte: Os autores.

As propriedades físico-mecânicas das amostras vulcanizadas dinamicamente foram avaliadas. Os corpos de prova foram obtidos pela técnica de compressão a quente. Os TPV triturados foram prensados em prensa hidráulica a 190 °C, por 3 minutos e sob pressão de 5 toneladas. Os ensaios mecânicos realizados neste trabalho: resistência à tração (de acordo com norma ASTM D638 - IV), índice de fluidez (ASTM D1238), resistência ao impacto (ASTM D256) e dureza (ASTM D2240). Em todos os testes a análise estatística foi aplicada para identificar tendências e relações entre as variáveis dos resultados obtidos.

A reciclagem dos materiais vulcanizados foi avaliada com a reutilização do corpo de prova ensaiado, após o teste de tração. O corpo de prova fraturado foi novamente adicionado ao molde, submetido a pressão e aquecimento em prensa hidráulica por 3 minutos, 3 toneladas e temperatura de 190 °C. A resistência à tração dos corpos de prova envelhecidos foi analisada e comparada com a amostra não envelhecida.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validação dos resultados mecânicos alguns testes estatísticos foram empregados, como Shapiro, Brown, ANOVA e TUKEY. Os resultados de resistência ao impacto das amostras dos TPVs estão apresentados na Tabela 2. As respostas dos valores obtidos apresentaram distribuição gaussiana, comprovado pelo teste estatístico de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965, p.591). O teste de Shapiro-Wilk é uma ferramenta estatística utilizada para verificar se a amostra segue a distribuição normal (gaussiana). Além disso, foi verificada a equivalência de variância por meio do teste de Brown-Forsythe (Brown & Forsythe, 1974, p. 364). O teste de Brown-Forsythe é utilizado para verificar se as variâncias de diferentes grupos de dados são estatisticamente equivalentes. O teste de Brown-Forsythe tem robustez em relação à violação da pressuposição de igualdade de variâncias entre os grupos comparados. Esse teste é especialmente útil quando os dados apresentam variâncias heterogêneas, pois ajusta os resultados levando em consideração essas diferenças, fornecendo análise mais precisa e confiável das diferenças estatísticas entre os grupos.

Com os resultados obtidos dos TPVs pôde-se afirmar que os dados possuem distribuição aproximada à normalidade, e que as variações das médias entre os grupos de dados são similares. Essas características fundamentam a confiabilidade e a representatividade dos valores obtidos para a resistência ao impacto dos TPVs. Assim, os resultados obtidos pelos ensaios mecânicos foram, após a realização dos testes estatísticos, considerados consistentes e confiáveis para a avaliação das propriedades mecânicas dos TPVs a base de PEBD e Pó de Pneu. Este resultado possibilita melhor compreensão do desempenho dos materiais, embasando a tomada de decisões para aplicações futuras.

Ao realizar a comparação dos dados de resistência ao impacto, por meio da análise estatística ANOVA, Tabela 2. Pode-se evidenciar as diferenças estatísticas entre as amostras. Esta afirmação é justificada pelos valores das médias entre os grupos de tratamento F (0,059) apresentarem magnitude maior que o esperado ao acaso, resultando em diferença estatística significativa ( $P = <0,001$ ).

O teste estatístico de Tukey, apresentado na Tabela 2, foi empregado para realizar a comparação das médias entre as amostras de TPV. O teste de Tukey, também conhecido como teste de comparações múltiplas de Tukey, destaca-se por sua capacidade de controlar o erro tipo I, que representa o risco de rejeitar erroneamente a hipótese nula (KIRK, 2013). Com base nos resultados obtidos por meio do teste de Tukey, foi constatada a ausência de diferença estatisticamente significativa entre as amostras de TPV 2 e TPV 3. Essa constatação sugere que a adição individual dos polímeros SBR e EVA não promovem modificações relevantes no comportamento de resistência ao impacto dessas amostras. Entretanto, é importante destacar que a maior diferença estatisticamente significativa foi observada entre as amostras de TPV1 e TPV 4. Esse resultado indica que a adição conjunta dos polímeros SBR e EVA tem impacto significativo no comportamento do TPV a base de PEBD/Pó de pneu. Os polímeros apresentam maior resistência ao impacto quando a energia é dispersa na matriz (Ahmad et al., 2018). Pelos resultados pode-se argumentar que há interação entre o PEBD/Pó de pneu quando se adiciona os agentes interfaciais conjuntamente. Este comportamento sugere que o desenvolvimento de formulações otimizadas de TPVs deve-se levar em consideração a sinergia entre os polímeros capaz de dissipar a energia de impacto.



Tabela 2 – Avaliação estatística da resistência ao impacto em J/M.

Teste de normalidade Shapiro-Wilks		P= 0,354	Passou			
Teste de Equivalencia de Variância		P= 0,822	Passou			
Amostras	n° de amostras	média	Desvio padrão	SEM		
TPV 1	6	0,342	0,0641	0,0262		
TPV 2	6	0,229	0,0666	0,0272		
TPV 3	6	0,184	0,0426	0,0174		
TPV 4	6	0,103	0,0645	0,0263		
ANOVA						
Fonte de variação	graus de liberdade	Soma dos Quadros	Média dos Quadrados	F	P	Fc
Entre grupo	3		0,179	0,059	16,42	<0,001
Resíduo	20	0,0726	0,00363			
Total	23	0,251				
Procedimentos de Comparação Múltipla aos Pares (Teste deTUKEY)						
Comparação	Diferença entre as médias p	q	P	P<0,050	Diferença Estatística	
TPV1 vs. TPV 4	0,239	4	9,712	<0,001	Sim	
TPV 1 vs. TPV 3	0,158	4	6,418	0,001	Sim	
TPV 1 vs. TPV 2	0,113	4	4,581	0,020	Sim	
TPV 2 vs. TPV 4	0,126	4	5,130	0,008	Sim	
TPV 2 vs. TPV 3	0,045	4	1,837	0,574	Não	

Fonte: Os autores.

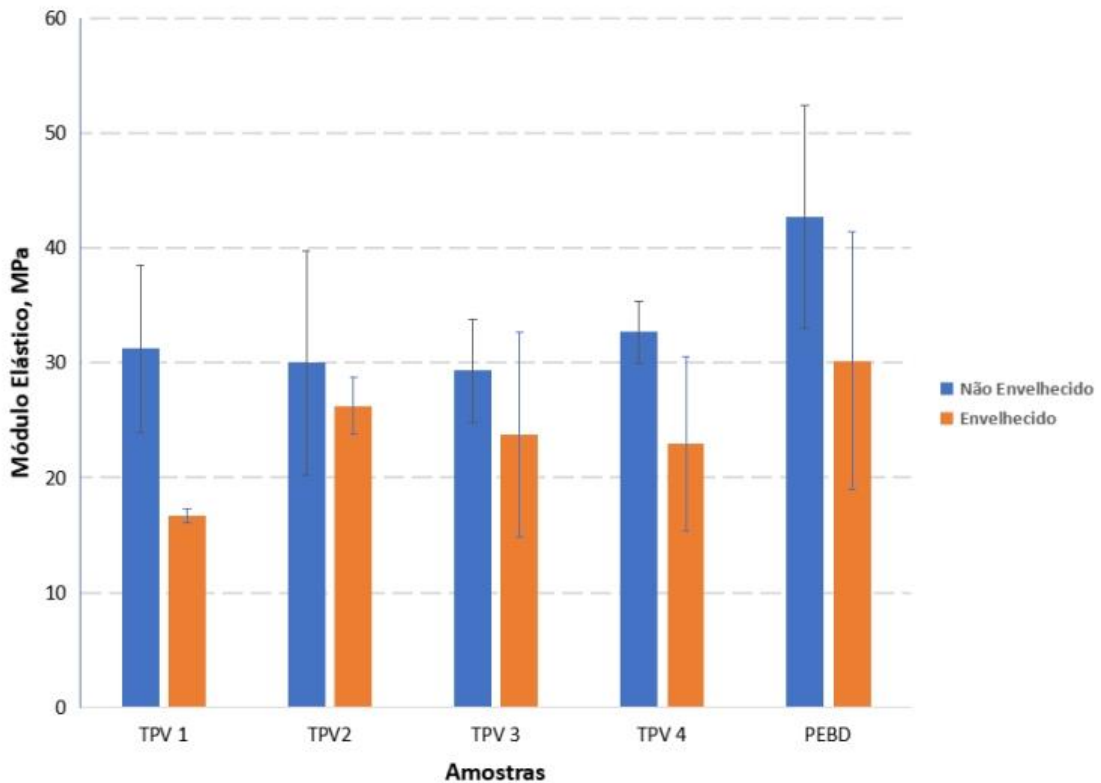
A resistência à tração dos materiais poliméricos vulcanizados, especialmente o TPV, é de extrema importância para a aplicação final no produto. A análise estatística de variância (ANOVA) foi utilizada nos resultados de resistência à tração, conforme demonstrado no Gráfico 1. Os valores do módulo elástico mostraram diferenças significativas com  $p < 0,05$ , no nível de confiança de 95%.

Ao analisar os resultados dos módulos elásticos dos TPVs não envelhecidos, verificou-se que não houve variação significativa em comparação com o polímero PEBD. O módulo elástico, mede a relação entre tensão e deformação dos materiais na região reversível. Os resultados com valores de modulo mais baixos, indicam maior deformação na ruptura. Isso sugere que a adição do pó de pneu, nas quantidades

estudadas, não afeta negativamente o valor inicial do polímero termoplástico. Entretanto, os valores médios de módulo elásticos das análises realizadas nas amostras de TPV indicam tendência de aumento de rigidez nos TPV compatibilizados com os polímeros EVA e SBR. Esse aumento pode ser resultado do sinergismo de propriedades, pois o termoplástico EVA tem maior escoamento, enquanto o SBR aumenta o módulo do TPV. Esses resultados enfatizam a importância de investigar as causas e mecanismos de degradação envolvidos, a fim de garantir a durabilidade e integridade do TPV em aplicações práticas. Estudos com amostras de TPV a base de PP/NBR teve aumento nas propriedades mecânicas ao modificar as condições de processamento (Carvalho & Sirqueira, 2016). Então além dos compatibilizantes a forma de processar é importante para obtenção de melhores propriedades mecânicas. Os TPVs representam um desafio significativo para os pesquisadores, pois manter as propriedades iniciais dos polímeros envolvidos é complexo, devido às diferenças estruturais e de massa molar dos polímeros. A importância da compatibilização em misturas de polímeros e a escolha de estratégias para superar essas dificuldades são importantes para melhorar as propriedades dos materiais (Alcântara et al., 2020; Bouchart et al., 2008; Sirqueira & Soares, 2007; Ferreira et al., 2011; Pereira et al., 2018; Paran et al., 2018; Soares et al., 2002a, 2002b).

Ao avaliar o comportamento dos materiais envelhecidos/reciclados, observou-se variação apenas no TPV não compatibilizado (TPV 1) em relação à amostra não envelhecida. O TPV 2 apresentou o menor valor de módulo elástico, o que pode ser atribuído à ausência de insaturações na cadeia do EVA, resistindo ao efeito térmico ao qual as amostras foram submetidas. Porém, entre os grupos de TPVs compatibilizados, as amostras não apresentaram variações significativas. Esse resultado indica a capacidade de retenção das propriedades dos TPVs após ciclos de reprocessamento, sugerindo que os TPVs produzidos são resistentes às alterações induzidas pelo envelhecimento ou reciclagem, mantendo suas propriedades mecânicas integras. Em misturas de pares dissimilares de polímeros com diferenças nas insaturações na cadeia principal, a manutenção das propriedades após o envelhecimento pode ser atribuída à presença de ligações cruzadas formadas durante o envelhecimento. Khan (2018) discute a formação de ligações cruzadas em polímeros insaturados, mantendo os valores iniciais das propriedades após o envelhecimento. Quando o polímero insaturado é misturado com outro polímero não insaturado, as ligações cruzadas podem se formar entre as cadeias poliméricas dos dois componentes, conferindo maior estabilidade e resistência ao material envelhecido.

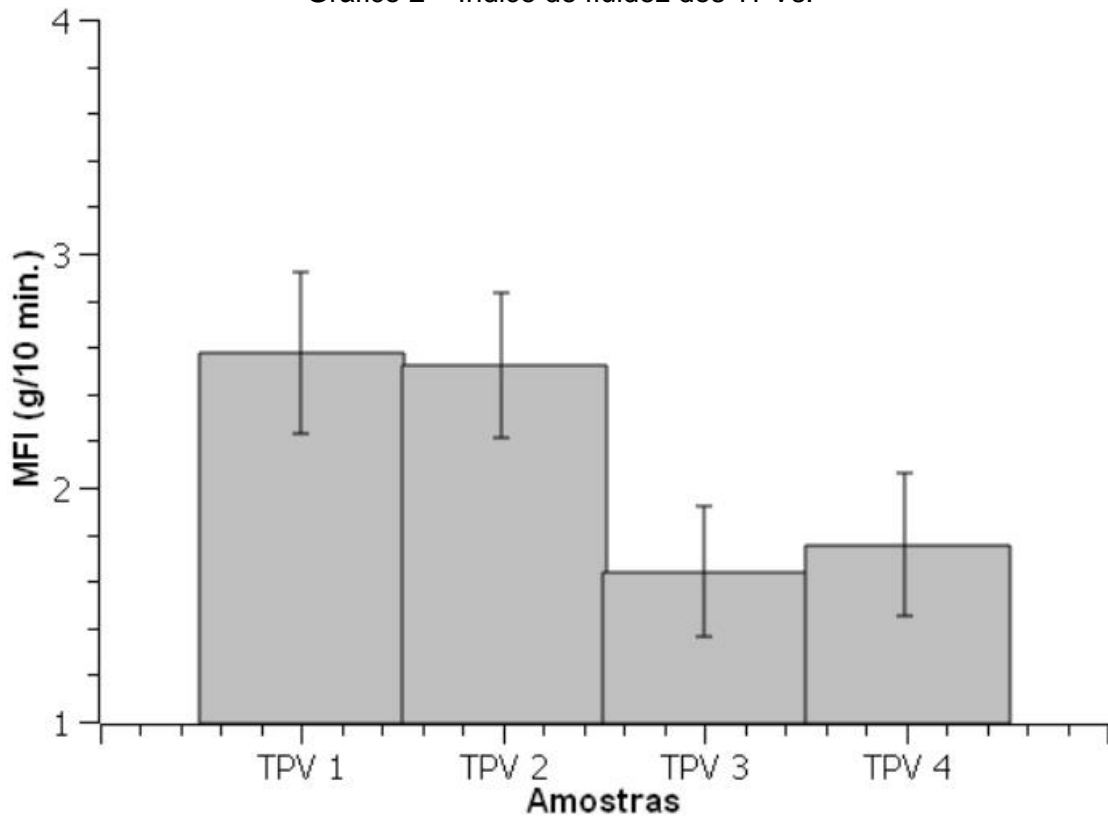
Gráfico 1 – Módulo elástico antes e após a reciclagem.



Fonte: autores.

Os resultados obtidos para o índice de fluidez dos TPVs são apresentados no Gráfico 2. Nota-se existir diferenças estatísticas nos valores de MFI, indicando aumento na resistência ao fluxo das amostras, especialmente para as amostras com o elastômero SBR (TPV 3 e TPV 4). Entretanto, quando estas amostras foram comparadas com as amostras TPV 1 e TPV 2 a diferença entre as médias é menor. Essa diminuição no índice de fluidez sugere que a adição do elastômero SBR confere maior viscosidade ao material, resultando em maior resistência ao fluxo e menor capacidade de deformação elástica. É importante destacar que a massa molar é um fator crucial que influencia o comportamento de escoamento dos polímeros. Polímeros com diferentes massas molares podem apresentar características reológicas distintas, incluindo viscosidade, resistência ao cisalhamento e comportamento de fluxo. Em geral, polímeros de alta massa molar tendem a exibir maior viscosidade em comparação com polímeros de baixa massa molar. Este comportamento ocorre devido à quantidade de interações e entrelaçamentos entre as cadeias poliméricas mais longas, o que dificulta o movimento relativo entre elas. Conseqüentemente, polímeros de alta massa molar requerem maior energia para fluir, resultando em viscosidade mais elevada. Essas observações são consistentes com estudos anteriores (Ghahramani et al., 2020). A literatura reporta a influência da massa molar na viscosidade de polímeros termoplásticos, sendo observado o aumento da viscosidade com o aumento da massa molar (Kort et al., 2020; Khunprasert et al., 2009; Stadler et al., 2009). O comportamento de fluxo de polímeros com diferentes massas molares e de baixa massa molar exibem comportamento newtoniano, enquanto polímeros de alta massa molar apresentam comportamento pseudoplástico (Agrawal et al., 2022).

Gráfico 2 – Índice de fluidez dos TPVs.

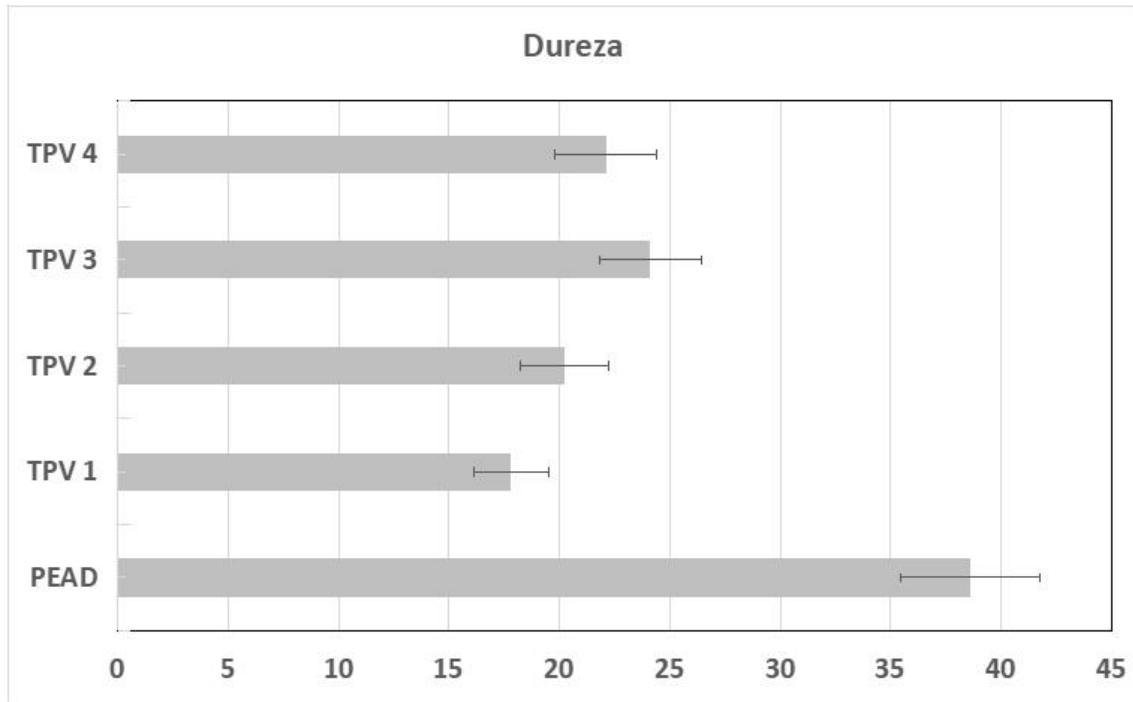


Fonte: autores.

Os resultados das propriedades mecânicas de dureza foram obtidos na escala Shore D, devido ao maior percentual de PEBD em relação à borracha. A dureza Shore D é utilizada para medir a resistência de materiais rígidos, incluindo plásticos, borrachas mais duras e materiais cerâmicos. Esse ensaio mede a resistência à penetração de um material, fornecendo informações sobre sua rigidez e resistência. Diferentemente do ensaio de dureza Shore A, empregado para materiais mais macios, como borrachas e elastômeros. O Gráfico 3 apresenta os resultados da dureza, uma representação gráfica dos valores que permite observar a distribuição dos dados, incluindo a mediana. Os resultados indicam que a adição do pó de pneu ao PEBD (TPV1) resultou na redução significativa da dureza do material, passando de 39 para 18 Shore D. Essa redução pode ser atribuída à presença do material mais macio proveniente dos pneus, que influencia diretamente na dureza final do TPV1. A variação na medida mecânica de dureza de um material pode ser causada por diversos fatores, incluindo o desgaste, envelhecimento, deformação plástica e adição de materiais mais macios (González et al., 2017c). No caso do TPV1, a adição do pó de pneu, que possui características mais elásticas, pode ter contribuído para a redução na dureza final. Entretanto, ao analisar os resultados entre os pares elastoméricos, notamos que a amostra com SBR (TPV3) apresentou o valor da mediana maior. Esse comportamento é consistente com os resultados obtidos para o módulo e o índice de fluidez (MFI), pois o polímero SBR, de maior massa molar, tem maior dureza (Rogulska, 2018). A combinação de polímeros com diferentes características proporcionou resultados variados de dureza, evidenciando a importância de se estudar a interação entre os componentes para obter TPV com as propriedades desejadas. Através dessas análises, busca-se aproveitar as propriedades elásticas do pó de pneu em conjunto com a facilidade de processamento

e versatilidade do PEBD, além de promover a interação entre os materiais através do copolímero de EVA e da borracha SBR.

Gráfico 3 – Dureza Shore D das amostras



Fonte: autores.

#### 4 CONCLUSÕES

A necessidade de explorar a utilização de resíduos sólidos de forma sustentável é uma preocupação crescente na área de engenharia de materiais.

Os resultados do teste de Tukey evidenciaram que a adição conjunta dos polímeros SBR e EVA tem efeito significativo no comportamento do TPV PEBD/Pó de pneu, enquanto a adição individual dos polímeros não apresentou diferenças estatísticas relevantes. Essas conclusões fornecem uma perspectiva valiosa para o desenvolvimento e aplicação de TPVs em diferentes contextos industriais.

A compatibilidade influencia diretamente nas propriedades mecânicas e de processamento dos TPVs.

A adição de pó de pneu no PEBD não afetou negativamente o valor de módulo elástico do polímero termoplástico. Porém, a técnica da compatibilização não reativa na produção dos TPVs resultou no aumento do módulo elástico. As amostras que sofreram as menores variações de envelhecimento foram as amostras com EVA, isto se deve a presença de ligações saturadas na cadeia principal.

Os resultados de MFI comprovam a influência da massa molar no comportamento de escoamento dos polímeros, com implicações importantes para o desenvolvimento e aplicação. Os resultados indicaram que o TPV compatibilizado com SBR tem a maior viscosidade, pois os elastômeros têm maior massa molar.

Os maiores valores de resistência ao impacto observada nos estudos foram para os TPVs com a adição dos polímeros SBR e EVA, ou em conjunto. A compatibilização afeta o comportamento do TPV PEBD/Pó de pneu, tornando-o mais resistente ao impacto.

A busca por soluções inovadoras que promovam a reciclagem e reutilização de resíduos de pneus demonstra o compromisso com a sustentabilidade e a preservação do meio ambiente, tornando os TPVs uma alternativa promissora para aplicações em diversos setores industriais.

A iniciação científica em TPV permitiu que os alunos desenvolvessem mentalidade investigativa e abordagem científica na resolução de problemas. O aprendizado passa pela formulação de hipóteses, planejamento de experimentos, coleta e análise de dados. Essas habilidades são altamente valorizadas no mercado de trabalho, pois capacitam os engenheiros de materiais a enfrentarem desafios complexos e propor soluções inovadoras.

## REFERÊNCIAS

- Agrawal, P., Silva, M. H. A., Cavalcanti, S. N., Freitas, D. M. G., Araújo, J. P., Oliveira, A. D. B., & Mélo, T. J. A. (2022). Rheological properties of high-density polyethylene/linear low-density polyethylene and high-density polyethylene/low-density polyethylene blends. *Polymer Bulletin*, 79(4), 2321–2343. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03635-8>
- American society for testing and materials D256-14 (2014). *Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- American society for testing and materials D638-14 (2014). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- American society for testing and materials D1238-14 (2014). *Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by extrusion Plastometer*. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- American society for testing and materials D2240-15 (2015). *Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness*. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- Ahmad, H. M., Kamal, M. S., & Al-Harhi, M. A. (2018). Rheological and filtration properties of clay-polymer systems: Impact of polymer structure. *Applied Clay Science*, 160, 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.01.016>
- Alcântara, S. P., Sirqueira, A. S., Santos, T. A., & Naccache, M. F. (2020). In Situ Compatibilization of Polyamide 6/Carboxylated Acrylonitrile Butadiene Rubber Blends with Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane. *Macromolecular Symposia*, 394(1). <https://doi.org/10.1002/masy.202000032>
- Bouchart, V., Bhatnagar, N., Brieu, M., Ghosh, A. K., & Kondo, D. (2008). Study of EPDM/PP polymeric blends: mechanical behavior and effects of compatibilization. *Comptes Rendus - Mecanique*, 336(9), 714–721. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2008.06.004>

- Brown, Morton B.; Forsythe, Alan B. (1974). Robust tests for the equality of variances. *Journal of the American Statistical Association*, 69(346): 364–367. <https://doi.org/10.1080/01621459.1974.10482955>
- Carvalho, A. P. A., & Sirqueira, A. S. (2016). Effect of compatibilization in situ on PA/SEBS blends. *Polimeros*, 26(2). <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2195>
- Cossa, M. M., Sirqueira, A. S., & Soares, B. G. (2009). Development of thermoplastic elastomers vulcanized (TPV) with polypropylene waste tire. I - Factorial design experiments. *Polimeros*, 19(3). <https://doi.org/10.1590/s0104-14282009000300006>
- Kort, G. W., Saidi, S., Hermida-Merino, D., Leone, N., Srinivas, V., Rastogi, S., & Wilsens, C. H. R. M. (2020). Importance of viscosity control for recyclable reinforced thermoplastic composites. *Macromolecules*, 53(15), 6690–6702. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.9b02689>
- Favakeh, M., Bazgir, S., & Karbasi, M. (2020). Dynamically vulcanized thermoplastic elastomer nanocomposites based on linear low-density polyethylene/styrene-butadiene rubber/nanoclay/bitumen: morphology and rheological behavior. *Iranian Polymer Journal (English Edition)*, 29(3), 209–217. <https://doi.org/10.1007/s13726-020-00786-9>
- Ferreira, K. R. M., Leite, I. F., Siqueira, A. D. S., Raposo, C. M. O., Carvalho, L. H., & Silva, S. M. L. (2011). The use of an organoclay on the compatibilization of PP/EPDM blends. *Polimeros*, 21(5). <https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000072>
- France, A. P. (2021, June 10). Pandemia provocou leve queda na produção mundial de plástico, a 3a desde a Segunda Guerra Mundial. *O Globo*. <https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/06/10/pandemia-provocou-leve-queda-na-producao-mundial-de-plastico-a-3a-desde-a-segunda-guerra-mundial.ghtml>
- Ghahramani, N., Iyer, K. A., Doufas, A. K., & Hatzikiriakos, S. G. (2020). Rheology of thermoplastic vulcanizates (TPVs). *Journal of Rheology*, 64(6), 1325–1341. <https://doi.org/10.1122/8.0000108>
- González, J., Rosales, C., González, M., León, N., Escalona, R., & Rojas, H. (2017). Rheological and mechanical properties of blends of LDPE with high contents of UHMWPE wastes. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(26). <https://doi.org/10.1002/app.44996>
- Gouveia, N. (2012). Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. *Ciência e Saúde Coletiva*, 17(6), 1503–1510.
- Innes, J. R., Shriky, B., Nocita, D., Thompson, G., Coates, P., Whiteside, B., Kelly, A., & Hebda, M. (2023). Development of thermoplastic vulcanizates based on polypropylene/ethylene propylene diene monomer for prototyping by Fused

Filament Fabrication. *Polymer*, 273.  
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.125839>

- Kassa, H. G., Stuyver, J., Bons, A. J., Haviland, D. B., Thorén, P. A., Borgani, R., Forchheimer, D., & Leclère, P. (2018). Nano-mechanical properties of interphases in dynamically vulcanized thermoplastic alloy. *Polymer*, 135, 348–354. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.11.072>
- Khunprasert, S., Thongyai, S., Chinsirikul, W., & Wacharawichanant, S. (2009). Effect of low-molar-mass liquid crystal on the melt processing conditions of polycarbonate using single screw extruder. *Journal of Applied Polymer Science*, 113(2), 752–756. <https://doi.org/10.1002/app.29873>
- Ma, P., Xu, P., Zhai, Y., Dong, W., Zhang, Y., & Chen, M. (2015). Biobased Poly(lactide)/ethylene-co-vinyl Acetate Thermoplastic Vulcanizates: Morphology Evolution, Superior Properties, and Partial Degradability. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 3(9), 2211–2219. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00462>
- Magioli, M., Sirqueira, A. S., & Soares, B. G. (2010). The effect of dynamic vulcanization on the mechanical, dynamic mechanical and fatigue properties of TPV based on polypropylene and ground tire rubber. *Polymer Testing*, 29(7). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.07.008>
- Ning, N., Li, S., Wu, H., Tian, H., Yao, P., HU, G. H., Tian, M., & Zhang, L. (2018). Preparation, microstructure, and microstructure-properties relationship of thermoplastic vulcanizates (TPVs): A review. In *Progress in Polymer Science* 79, pp. 61–97. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.11.003>
- Ning, N., Li, X., Tian, H., Hua, Y., Zuo, H., Yao, P., Zhang, L., Wu, Y., Hu, G. H., & Tian, M. (2017). Unique microstructure of an oil resistant nitrile butadiene rubber/polypropylene dynamically vulcanized thermoplastic elastomer. *RSC Advances*, 7(9), 5451–5458. <https://doi.org/10.1039/c6ra24891h>
- Paran, S. M. R., Naderi, G., Ghoreishy, M. H. R., & Heydari, A. (2018). Enhancement of mechanical, thermal and morphological properties of compatibilized graphene reinforced dynamically vulcanized thermoplastic elastomer vulcanizates based on polyethylene and reclaimed rubber. *Composites Science and Technology*, 161, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.04.006>
- Pereira, E. C. L., Soares, B. G., Jesus, R. B., & Sirqueira, A. S. (2018). DGEBA-Based Epoxy Resin as Compatibilizer for Biodegradable Poly (lactic acid)/Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blends. *Macromolecular Symposia*, 381(1). <https://doi.org/10.1002/masy.201800133>
- Ponsard-Fillette, M., Barrès, C., & Cassagnau, P. (2005). Viscoelastic study of oil diffusion in molten PP and EPDM copolymer. *Polymer*, 46(23), 10256–10268. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.08.015>



- Rogulska, M. (2018). Transparent sulfur-containing thermoplastic polyurethanes with polyether and polycarbonate soft segments. *Polymer Bulletin*, 75(3), 1211–1235. <https://doi.org/10.1007/s00289-017-2088-x>
- Ruiz, B. A., Cintho, O. M., & Soweck, A. B. (2020). Caracterização de misturas de peuamm com resíduo de pneu obtidos através de moagem de alta energia. *Brazilian Journal of Development*, 6(3), 9746–9759. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-013>
- Santos, E. S., Cristina, A., & Brêtas, P. (2013). Ensinando e aprendendo educação ambiental com jovens. *Revista Ciência Em Extensão*, 9(3), 82–93.
- Shapiro, S.S., Wilk, M.B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(4), 591-611. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Scares, B. G., Almeida, M. S. M., Leyva, M. E., & Sirqueira, A. S. (2006). Mechanical and morphological properties of polypropylene/nitrile butadiene rubber compatibilized vulcanizates. *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 59(3).
- Silva, J. B. da, Pereira, I. N. A., & Pinheiro, É. C. N. M. (2021). Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de borracha de pneus em pavimentos asfálticos / Analysis of the technical feasibility of using waste tire rubber in asphalt sidewalks. *Brazilian Journal of Development*, 7(11), 108529–108544. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n11-467>
- Sirqueira, A. da S., & Fiore, C. A. G. (2022). Resíduo de pneus inservíveis na composição da massa asfáltica. *Brazilian Journal of Development*, 8(10), 68538–68548. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n10-230>
- Sirqueira, A. da S., & Santos, M. C. C. (2023). Escolaridade e educação ambiental na região da extrema zona oeste do Rio de Janeiro. *Revista Sociedade e Tecnologia*, 19, 136–148. <https://doi.org/10.3895/rts.v19n55.15109>
- Sirqueira, A. S., & Soares, B. G. (2002). Mercapto-modified copolymers in elastomer blends. IV. The compatibilization of natural rubber/EPDM blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 83(13). <https://doi.org/10.1002/app.10283>
- Sirqueira, A. S., & Soares, B. G. (2007). Compatibilization of natural rubber/EPDM blends by anhydride- and mercapto-functionalized copolymers. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 46 B(4). <https://doi.org/10.1080/00222340701386569>
- Soares, B. G., De Oliveira, M., Meireles, D., Sirqueira, A. S., & Mauler, R. S. (2008). Dynamically vulcanized polypropylene/nitrile rubber blends: The effect of peroxide/bis-maleimide curing system and different compatibilizing systems. *Journal of Applied Polymer Science*, 110(6). <https://doi.org/10.1002/app.28946>
- Soares, B. G., Freitas, J. B., Silva, A. A., & Sirqueira, A. S. (2019). Thermoplastic vulcanizates based on dynamically vulcanized polypropylene/carboxylated nitrile

- rubber blends. *Rubber Chemistry and Technology*, 92(3).  
<https://doi.org/10.5254/rct.19.81480>
- Soares, B. G., Santos, D. M., & Sirqueira, A. S. (2008). A novel thermoplastic elastomer based on dynamically vulcanized polypropylene/acrylic rubber blends. *Express Polymer Letters*, 2(8). <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2008.72>
- Soares, B. G., Sirqueira, A. S., Oliveira, M. G., & Almeida, M. S. M. (2002a). Compatibilization of elastomer-based blends. *Macromolecular Symposia*, 189. <https://doi.org/10.1002/masy.200290006>
- Soares, B. G., Sirqueira, A. S., Oliveira, M. G., & Almeida, M. S. M. (2002b). The reactive compatibilization of EPDM-based elastomer blends. *KGK-Kautschuk Und Gummi Kunststoffe*, 55(9).
- Song, L. F., Bai, N., Shi, Y., Wang, Y. X., Song, L. X., & Liu, L. Z. (2023). Effects of Ethylene-Propylene-Diene Monomers (EPDMs) with Different Moony Viscosity on Crystallization Behavior, Structure, and Mechanical Properties of Thermoplastic Vulcanizates (TPVs). *Polymers*, 15(3).  
<https://doi.org/10.3390/polym15030642>
- Stadler, F. J., Kaschta, J., Münstedt, H., Becker, F., & Buback, M. (2009). Influence of molar mass distribution and long-chain branching on strain hardening of low density polyethylene. *Rheologica Acta*, 48(5), 479–490.  
<https://doi.org/10.1007/s00397-008-0334-8>
- Teixeira, T. S., Marques, É. A., & Pereira, J. R. (2017). Educação ambiental em escolas públicas: caminho para adultos mais conscientes. *Revista Ciência em Extensão*, 13(1), 64-71.  
[https://ojs.unesp.br/index.php/revista\\_proex/article/view/1370](https://ojs.unesp.br/index.php/revista_proex/article/view/1370)
- Tian, M., Han, J., Wu, H., Tian, H., She, Q., Chen, W., & Zhang, L. (2012). Effect of the compatibility on the morphology and properties of acrylonitrile-butadiene rubber/polypropylene thermoplastic vulcanizates. *Journal of Applied Polymer Science*, 124(3), 1999–2006. <https://doi.org/10.1002/app.35222>
- Yao, P., Wu, H., Ning, N., Zhang, L., Tian, H., Wu, Y., Hu, G., Chan, T. W., & Tian, M. (2016). Properties and unique morphological evolution of dynamically vulcanized bromo-isobutylene-isoprene rubber/polypropylene thermoplastic elastomer. *RSC Advances*, 6(14), 11151–11160.  
<https://doi.org/10.1039/c5ra26171f>